佟乐，孙冰华，鲁浩文，等. 耐消化挂面专用小麦粉原料选择研究 [J]. 食品工业科技，2026, 47(3)：321−330. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020114

TONG Le, SUN Binghua, LU Haowen, et al. Raw Material Selection of Appropriative Wheat Flour for Dried Noodles with Low Starch Digestion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 321−330. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020114

· 分析检测 ·

耐消化挂面专用小麦粉原料选择研究

佟　乐，孙冰华，鲁浩文，卢苏琪，王晓曦*

（河南工业大学粮油食品学院，河南郑州 450001）

摘　要：为满足消费者对挂面日益增长的健康化需求，促进专用小麦粉产业高质量发展，选取全国范围内 16 种挂面专用小麦粉为研究对象，对其营养、加工和食用品质 3 个维度共 40 项品质指标进行测定，采用体外动态模拟消化系统对所制作挂面进行消化，借助相关性分析、主成分分析和聚类分析得到耐消化挂面专用小麦粉的关键指标及其推荐取值范围。结果表明，16 种挂面专用粉的品质指标变异系数范围为 1.13%~227.90%，具有代表性；相关性分析和主成分分析结合变异系数筛选出耐消化挂面专用小麦粉的关键指标为 B 淀粉、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间、峰值黏度和糊化焓值，聚类分析得到适合作为耐消化挂面专用粉的关键指标参考取值范围：B 淀粉含量 10.15%~16.91%、灰分含量 0.42%~0.73%、粗细度 10xx/11xx 质量占比 6.06%~26.20%、面团形成时间 4.20~15.00 min、峰值黏度 1492.00~2697.00 cP、糊化焓值 1.34~2.85 J/g。本研究可为挂面专用粉耐消化性品质的预测以及营养功能性挂面的开发提供理论参考。

关键词：挂面专用小麦粉，体外动态模拟消化，主成分分析，聚类分析，淀粉消化性

中图分类号：TS211.7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2026)03−0321−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020114

本文网刊：

Raw Material Selection of Appropriative Wheat Flour for Dried Noodles with Low Starch Digestion

TONG Le，SUN Binghua，LU Haowen，LU Suqi，WANG Xiaoxi*

（College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China）

Abstract: In order to fill consumers' growing demands for healthy dried noodles and promote the high-quality development of the wheat flour industry, 16 types of wheat flours nationwide were selected as research subjects, 40 quality indicators were evaluated from three dimensions, including nutrition, processing and edible quality. The dried noodles produced with these wheat flour samples were further digested using an *in vitro* dynamic simulation digestion system, and then the key indicators and their value ranges of wheat flour that suitable for producing digestion-resistant noodles were identified through correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. Results showed that the variation coefficients of quality indicators of these wheat flour samples ranged from 1.13% to 227.90%, indicating their more representative. According to correlation analysis and principal component analysis, the key indicators of wheat flour for dried noodles with resistant starch digestion were identified as B-starch content, ash content, flour particle size (10xx/11xx), dough development time, peak viscosity, and gelatinization enthalpy. Meanwhile the reference ranges for these key indicators were provided by cluster analysis, which were B-starch content of 10.15%~16.91%, ash content of 0.42%~0.73%, the mass ratio of flour with particle size (10xx/11xx) that was 6.06%~26.20%, dough development time of 4.20~15.00 minutes, peak viscosity of 1492.00~2697.00 cP, and gelatinization enthalpy of 1.34~2.85 J/g. This study can provide a theoretical reference for predicting the resistant-digestion quality of wheat flour for dried noodles and for developing nutritious and functional noodle products.

收稿日期：2025−02−17

基金项目：“十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD2100903）；河南省科技研发计划联合基金项目（232103810069）；中国博士后科学基金面上项目（2024M760291）；山东省基地和人才计划（博士后）项目（SDCX-ZG-202400135）。

作者简介：佟乐（2001−），女，硕士研究生，研究方向：谷物资源开发与利用，E-mail: 15265498032@163.com。

*** 通信作者：**王晓曦（1963−），男，博士，教授，研究方向：谷物资源开发与利用，E-mail: xiaoxiwang@haut.edu.cn。

Key words: wheat flour for dried noodles; *in vitro* dynamic digestion simulation; principal component analysis; cluster analysis; digestibility of starch

挂面专用小麦粉制作出的挂面相比普通粉口感劲道、色泽更好, 不易断条和糊汤。现阶段挑选挂面专用小麦粉时大多从挂面感官角度(如色泽、外观及口感)和食用品质等方面对小麦粉品质指标进行把控。如王伟鹏等[1] 根据挂面工艺特点和用户对挂面颜色、外观及口感方面的要求, 明确了适合手工挂面的专用小麦粉关键品质指标及其范围。金铭[2] 以挂面蒸煮与食用品质为依据, 得出回生值和峰值黏度等作为挂面专用粉的筛选指标。目前我国关于挂面专用粉评价现行标准仅有 1993 年 3 月颁布的行标 LS/T 3202-1993 面条用小麦粉, 也是以挂面面条品尝评分值作为参考, 对专用小麦粉理化指标进行规定。另一方面, 近年来肥胖和饮食相关疾病的发病率不断上升[3], 随着消费者营养意识的提高, 除了关注口感、色泽等因素, 在挂面营养功能性方面也提出了更高的要求, 具备低消化性的挂面更易受到消费者的青睐。因此, 仅从挂面感官、食用等品质方面来规定专用粉已不能满足消费者的健康化需求, 从原料端明确适合加工耐消化挂面专用粉的关键影响指标及阈值区间, 对今后挂面专用粉的品质预测和市场开发有重要意义。

目前有关耐消化挂面原料粉方面的研究多是采用小麦粉与其他成分复配得到混合粉, 如在小麦粉中添加苦荞粉、燕麦粉、青稞粉等杂粮, 以及高直链玉米淀粉、谷朊粉和麦麸膳食纤维等功能性成分来降低淀粉消化速率[4−7], 缺乏单纯从小麦粉原料品质端角度切入来进行耐消化挂面专用小麦粉选择的研究。另外, 目前主成分分析与聚类分析相结合的方法在小麦粉原料指标筛选方面有着较广泛应用。李建华[8] 选用包含高、中、低筋的 20 种市售小麦粉, 对其糊化特性和流变学特性等进行测定, 结合主成分分析和聚类分析筛选出了适合于制作发酵包子小麦粉的指标范围。隋勇等[9] 测定了 2 个不同等级小麦粉和 12 个不同粉路小麦次粉的营养品质和加工特性, 采用主成分分析提取了 4 个主成分, 结合聚类分析成功筛选出不同粉路小麦次粉品质评价的主要指标。

基于此, 本研究选取全国范围内 16 种挂面专用小麦粉为研究对象, 对小麦粉的营养特性、加工品质和食用品质 3 个维度共 40 项品质指标进行测定, 采用 DHSI-IV 动态模拟消化系统进行体外模拟消化, 借助变异性分析、相关性分析和主成分分析筛选出耐消化挂面专用小麦粉关键性指标, 结合聚类分析方法得到上述关键性指标的取值范围。以期直接从原料品质角度上判断是否为一款具有耐消化淀粉特性的挂面原料, 从而为挂面专用粉的品质改良和产品预测提供参考, 为后续低 GI 挂面的开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

挂面专用小麦粉　选用来自全国 10 个省份的 16 个不同样品(表 1); α-淀粉酶(11 U/mg, 编号 S31302)　上海源叶生物科技有限公司; 胃蛋白酶(3000 U/mg, 编号 P110927)　上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 胰酶(4000 U/mg, 编号 P916050)、胆盐(编号 B875069)　上海麦克林生化科技有限公司; 淀粉总含量(total starch)检测试剂盒、直链淀粉/支链淀粉含量(amylose/amylopectin)检测试剂盒、膳食纤维含量(total dietary fibre kit)检测试剂盒　爱尔兰 Megazyme 公司。

表 1　16 个挂面专用小麦粉样品

Table 1　Sixteen varieties of wheat flour for dried noodles

编号	挂面粉样品	编号	挂面粉样品
F1	内蒙1号	F9	河南2号
F2	新疆1号	F10	河北1号
F3	辽宁1号	F11	山东2号
F4	四川1号	F12	江苏1号
F5	广东1号	F13	河南3号
F6	浙江1号	F14	山东3号
F7	河南1号	F15	河南4号
F8	山东1号	F16	河南5号

Mastersizer 3000 激光粒度仪　英国 Malvern 马尔文仪器公司; DSC 200 F3 差示扫描量热仪　德国 Netzsch 公司; 150 型面条实验机组　河南东方面机集团; DHSI-IV 动态模拟人胃肠消化系统　晓东宜健(苏州)仪器设备有限公司; QSJ-D02Q1 样品绞碎机　广东小熊电器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　挂面专用小麦粉品质指标的测定

1.2.1.1　营养品质指标的测定　总淀粉测定采用总淀粉检测试剂盒; 直链淀粉含量测定采用直链/支链淀粉含量检测试剂盒。

水分、损伤淀粉、蛋白质、氨基酸、脂肪、硫胺素、核黄素、烟酸、泛酸、膳食纤维分别按照 GB 5009.3-2016、GB/T 31577-2015、GB 5009.5-2016、GB 5009.124-2016、GB 5009.6-2016、GB 5009.84-2016、GB 5009.85-2016、GB 5009.89-2023、GB 5009.210-2023、GB 5009.88-2023 测定。

B 淀粉含量测定参照 Guo 等[10]、尚保华等[11] 的方法稍加改进。小麦淀粉提取采用面团法, 向面粉中加入 60% 的蒸馏水调制成面团, 静置 20 min, 水洗面团, 将所有淀粉浆过 100 目筛后 3000 r/min 离心 10 min, 倒掉上清液, 小心刮去最上层淡黄色物质, 收集下层淀粉, 置于 45 ℃ 烘箱烘干, 粉碎过 100 目筛,

即得小麦全淀粉样品，采用激光粒度仪检测淀粉样品粒径分布（以去离子水为分散剂，颗粒折射率为1.530），计算 B 淀粉（<10 μm）体积含量。

1.2.1.2　加工品质指标的测定　灰分、湿面筋、粉质特性和 RVA 糊化特性分别按照 GB 5009.4-2016、GB/T 5506.2-2008、GB/T 14614-2019、GB/T 24853-2010 测定。

小麦粉粗细度按照 GB/T 5507-2008 测定，筛网规格为 9xx、10xx、11xx、12xx、13xx、14xx、15xx，分别对应 150、137、123、112、100、95、88 μm 孔径。

热特性参数测定采用差示扫描量热仪（differential scanning calorimetry，DSC），参照付兆燕等[12]的方法并稍作改动：面粉样品与去离子水的添加量按照质量比 1∶3 配制并加入到铝坩埚中，对其进行压盖密封处理，在室温条件下平衡 12 h。测试条件：在氮气气氛下以 10 ℃/min 的加热速率从 30 ℃ 加热到 100 ℃。

1.2.1.3　食用品质指标的测定　烹调时间、熟断条率和烹调损失率测定按照 GB/T 40636-2021 附录 C 方法。

1.2.2　挂面样品的制备　依据 GB/T 35875-2018 规定的方法并稍作改动。参照附录 A，根据每种小麦粉样品的实际水分含量调整称粉量，使其干物质等同于 200 g 水分含量为 13.5% 的小麦粉，精确至 0.1 g。将样品倒入和面机内，加入一定量的蒸馏水，每百克小麦粉加水量按粉质吸水率的 46%~48% 计算，和面机调至 3 档和面 5 min 形成面絮，置于自封袋中醒发 10 min，之后依次在 3.0、2.5、2.0、1.5 mm 压片，然后用电子游标卡尺测定面片厚度，根据面片厚度将压辊间距调节为 1.25±0.03 mm，将面片切成宽度约为 2.0 mm 的面条，并挂于专用烘箱干燥 4 h 得到挂面。

1.2.3　挂面体外淀粉水解率的测定

1.2.3.1　模拟消化液的配制　参照 Minekus 等[13]的方法配制唾液模拟液（simulated saliva fluid，SSF）、胃液模拟液（simulated gastric fluid，SGF）和肠液模拟液（simulated intestinal fluid，SIF）。模拟消化液由储备液、酶、$CaCl_2$ 和水组成，消化当天配制，且使用前均于 37 ℃ 保温。其中将 α-淀粉酶和 $CaCl_2·2H_2O$（0.3 mol/L）溶解于唾液储备液中使其分别在 SSF 中的最终浓度达到 150 U/mL 和 1.5 mmol/L；胃蛋白酶和 $CaCl_2·2H_2O$（0.3 mol/L）溶解于胃液储备液中使其分别在 SGF 中的最终浓度达到 4000 U/mL 和 0.15 mmol/L；胰酶、胆盐和 $CaCl_2·2H_2O$（0.3 mol/L）溶解于肠液储备液中使其分别在 SIF 中的最终浓度达到 200 U/mL、20 mmol/L 和 0.6 mmol/L。$CaCl_2·2H_2O$ 溶液应于消化前加入，防止钙离子形成沉淀。储备液由 0.5 mol/L KCl、0.5 mol/L KH_2PO_4、1 mol/L $NaHCO_3$、2 mol/L NaCl、0.15 mol/L $MgCl_2·6H_2O$、0.5 mol/L $(NH_4)_2CO_3$ 等盐溶液组成。

1.2.3.2　体外模拟消化实验　每种挂面样品严格按 1.2.1.3 测得的烹调时间于消化当天煮熟。称取 50 g 挂面样品（干基），煮熟后使用绞碎机绞碎（10 s），以模拟人口腔咀嚼。加入 50 mL 预先 37 ℃ 保温的 SSF（pH7）混合均匀，采用分批进样方式，立即将混合好的模拟口腔食糜在消化第 1 min 和第 3 min 分两次（模拟人吞咽）放入动态体外模拟人胃肠消化模型。累计添加 SGF（pH3）372 mL 和 SIF（pH7）558 mL，模型中空腹 SGF 为 20 mL。设备运行参数[14]如下：胃倾斜角，0~10 min 以 1°/min 的角度倾斜速率（速率为正表示胃顺时针倾斜）倾斜 10°，11~30 min 以 0.4°/min 速率继续倾斜 8°，31~180 min 以−0.4°/min 速率（速率为负表示胃逆时针倾斜）倾斜 60°，最终胃模型的总倾斜角度为−42°。幽门挤压频率为 2 次/min，挤压末端位置 6.5 mm，挤压张开位置 6 mm。十二指肠的运行段速为 12 r/min，小肠压滤的频率为 10 s^{-1}，小肠阀每间隔 4.9 min 打开 0.1 min，此参数下的模拟成人胃肠消化时间为 4 h。取样：消化 120 min 和 240 min（消化终点）时从小肠末端分别取 15 mL 消化产物，沸水浴 5 min 以终止酶解反应。

1.2.3.3　淀粉水解率的测定　分别测定 16 种挂面样品不同消化时刻消化产物的淀粉水解率。具体参照张苹等[15]的方法，采用 3,5-二硝基水杨酸（DNS）法测定还原糖含量，在 540 nm 下测定吸光度值。淀粉水解率计算公式如下：

$$H = \frac{0.95 \times M_C \times V}{m \times S \times (100 - M)} \times 100$$

式中：H 为不同消化时刻的淀粉水解率，%；M_C 为食糜中的还原糖质量浓度，g/mL；V 为食糜体积，mL；m 为挂面样品体外消化时的质量，g；S 为挂面样品的总淀粉质量分数，g/100 g（以干样质量计）；M 为挂面样品的水分质量分数，g/100 g（以样品质量计）；0.95 为还原糖质量转换成淀粉的化学计量常数。

1.3　数据处理

实验至少平行三次，采用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件对数据进行单因素 ANOVA 方差分析（采用 Duncan 法进行多重比较）、Pearson 相关性分析、变异性分析、主成分分析和聚类分析；采用 Origin 2024b 软件进行图形的绘制。

2　结果与分析

2.1　16 种挂面专用小麦粉品质指标描述性分析

2.1.1　小麦粉营养品质指标描述性分析　16 种挂面专用小麦粉营养指标（以干基计）如表 2 所示。淀粉相关指标中，总淀粉范围为 74.47%~85.12%，直链淀粉范围为 21.99%~33.91%，损伤淀粉范围为 5.17%~6.69%，B 淀粉范围为 10.15%~19.78%。其中直链淀粉和 B 淀粉的变异系数为 26.84% 和 16.61%，表明两者数据分布相对于总淀粉和损伤淀粉较为分散，离散程度较大。蛋白质范围为 11.08%~14.17%，脂肪范围为 0.91%~2.05%，氨基酸总量（TAA）范围

表 2 16 种挂面小麦粉营养品质指标

Table 2 Nutritional indicators of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	总淀粉（%）	直链淀粉（%）	损伤淀粉（%）	B淀粉（%）	脂肪（%）	蛋白质（%）	TAA（g/100 g）	膳食纤维（%）	B族维生素			
									V_{B1}（mg/100 g）	V_{B2}（mg/100 g）	V_{B3}（μg/100 g）	V_{B5}（mg/100 g）
F1	79.22±0.21^{c}	23.65±3.37^{cd}	5.72±0.11^{c}	16.93±0.74^{abcd}	1.31±0.06^{b}	12.07±0.00^{g}	12.44±0.02^{d}	2.03±0.10^{bc}	–	–	172.57±1.98^{l}	0.32±0.00^{k}
F2	75.87±0.15^{def}	27.99±0.30^{bc}	6.08±0.07^{b}	17.62±1.82^{abc}	1.03±0.30^{b}	14.01±0.06^{b}	13.95±0.01^{a}	3.22±1.51^{a}	0.27±0.00	–	185.39±0.00^{j}	0.36±0.00^{h}
F3	76.27±0.35^{cdef}	33.91±1.13^{a}	6.09±0.02^{b}	10.15±0.89^{g}	1.57±0.12^{ab}	13.49±0.02^{c}	12.97±0.01^{b}	2.48±0.36^{b}	0.19±0.00	–	389.26±0.00^{a}	0.43±0.00^{c}
F4	75.92±0.06^{def}	27.71±0.76^{bc}	5.17±0.03^{e}	16.92±2.04^{abcd}	1.45±0.30^{ab}	11.79±0.08^{h}	11.94±0.02^{f}	1.80±0.04^{bc}	–	–	330.14±0.00^{b}	0.42±0.00^{d}
F5	74.47±0.12^{f}	27.30±1.02^{bcd}	5.65±0.06^{c}	16.40±1.53^{abcde}	1.29±0.60^{b}	12.91±0.01^{d}	12.55±0.01^{c}	1.71±0.04^{bc}	–	–	191.05±0.00^{g}	0.24±0.00^{n}
F6	76.76±0.57^{cdef}	26.57±3.25^{bcd}	6.54±0.06^{a}	19.15±2.28^{ab}	1.02±0.14^{b}	11.08±0.04^{j}	10.74±0.01^{k}	1.79±0.12^{bc}	–	–	179.30±0.00^{k}	0.35±0.00^{i}
F7	78.39±0.10^{cde}	24.93±0.66^{cd}	5.69±0.08^{c}	18.72±1.03^{ab}	1.43±0.30^{ab}	11.45±0.02^{i}	11.34±0.01^{h}	1.52±0.12^{bc}	–	–	127.23±0.00^{p}	0.40±0.00^{f}
F8	78.64±0.06^{cd}	27.91±0.30^{bc}	6.15±0.02^{b}	16.91±0.65^{abcd}	0.91±0.01^{b}	12.71±0.17^{e}	12.08±0.03^{e}	1.55±0.07^{bc}	–	–	141.43±0.00^{n}	0.35±0.00^{i}
F9	76.84±0.12^{cdef}	22.94±0.61^{cd}	5.62±0.04^{c}	13.77±2.01^{cdef}	1.08±0.30^{b}	12.46±0.04^{f}	11.57±0.02^{g}	1.85±0.04^{bc}	0.10±0.00	–	245.25±0.00^{e}	0.51±0.00^{a}
F10	77.01±0.07^{cdef}	23.77±5.26^{cd}	6.09±0.11^{b}	12.40±2.55^{ef}	2.05±0.51^{a}	11.30±0.10^{i}	10.21±0.04^{l}	1.67±0.15^{bc}	–	–	144.70±0.00^{m}	0.38±0.00^{g}
F11	75.30±0.06^{f}	24.71±0.85^{cd}	6.59±0.13^{a}	19.78±2.47^{a}	1.02±0.17^{b}	11.39±0.03^{i}	10.09±0.02^{m}	1.78±0.18^{bc}	–	–	190.73±1.98^{h}	0.41±0.00^{e}
F12	76.62±0.54^{cdef}	27.09±2.82^{bcd}	6.57±0.04^{a}	16.34±1.53^{abcde}	0.97±0.32^{b}	12.73±0.03^{e}	12.16±0.00^{e}	2.01±0.08^{bc}	0.12±0.00	–	254.35±0.00^{d}	0.42±0.00^{d}
F13	75.32±0.04^{ef}	28.60±1.26^{bc}	5.37±0.06^{d}	18.67±2.19^{ab}	1.16±0.35^{b}	11.78±0.00^{h}	10.99±0.00^{i}	1.69±0.14^{bc}	–	–	189.04±0.00^{i}	0.30±0.00^{l}
F14	82.18±0.08^{b}	31.30±0.23^{b}	5.65±0.16^{c}	13.46±1.24^{def}	1.33±0.02^{b}	14.17±0.06^{a}	11.61±0.01^{f}	1.58±0.06^{bc}	–	–	291.35±0.00^{c}	0.34±0.00^{j}
F15	85.12±0.12^{a}	21.99±0.76^{d}	6.69±0.01^{a}	18.04±1.12^{ab}	1.58±0.16^{ab}	12.06±0.03^{g}	11.24±0.02^{g}	1.40±0.04^{c}	–	–	137.24±0.00^{o}	0.28±0.00^{m}
F16	82.24±0.12^{b}	26.04±0.86^{bcd}	6.00±0.05^{b}	15.45±1.64^{bcde}	1.15±0.31^{b}	12.98±0.06^{d}	10.70±0.00^{j}	2.26±0.20^{bc}	–	–	199.76±0.00^{f}	0.46±0.00^{b}
变异系数(%)	4.74	26.84	7.64	16.61	23.57	7.67	8.81	39.16	227.90	–	35.06	18.69

注: 变异系数(Coefficient of Variation, CV)(%)=标准差/平均值×100; 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表3~表7同。

为 10.088~13.952 g/100 g, 膳食纤维范围为 1.40%~3.22%, 烟酸(V_{B3})、泛酸(V_{B5})含量范围分别为 127.23~389.26 μg/100 g 和 0.24~0.51 mg/100 g。另外硫胺素(V_{B1})仅在 F2、F3、F9 和 F12 四种粉中检出, 核黄素(V_{B2})在所有样品里未检出(<0.050 mg/100 g)。脂肪、硫胺素、烟酸、泛酸、膳食纤维的变异系数均大于 10%, 分别为 23.57%、227.90%、35.06%、18.69% 和 39.16%, 蛋白质与氨基酸总量变异系数较小, 分别为 7.67% 和 8.81%, 表明两指标数据分布较为集中。

2.1.2 小麦粉加工品质指标描述性分析 灰分既是表征加工精度的重要指标, 也可作为衡量小麦粉矿质元素含量的营养指标, 由图 1 可得, 16 种挂面小麦粉灰分(以干基计)含量范围为 0.29%~0.83%, 变异系数为 28.66%, 从变异系数上来看小麦粉灰分含量跨度较大; 湿面筋(以干基计)含量范围为 29.75%~37.44%, 变异系数为 9.94%。小麦粉粗细度即粒度, 以残留在规定筛层上的粉类占试样的质量分数表示, 由表 3 可得, 8 类不同粗细度粉的变异系数, 除'-/9xx'为 47.30% 外, 其余 7 类均大于 50%, 表明 16 种挂面小麦粉粗细度分布相差较大, 受样品影响较大。

小麦粉粉质特性是反映面团流变学特性的重要

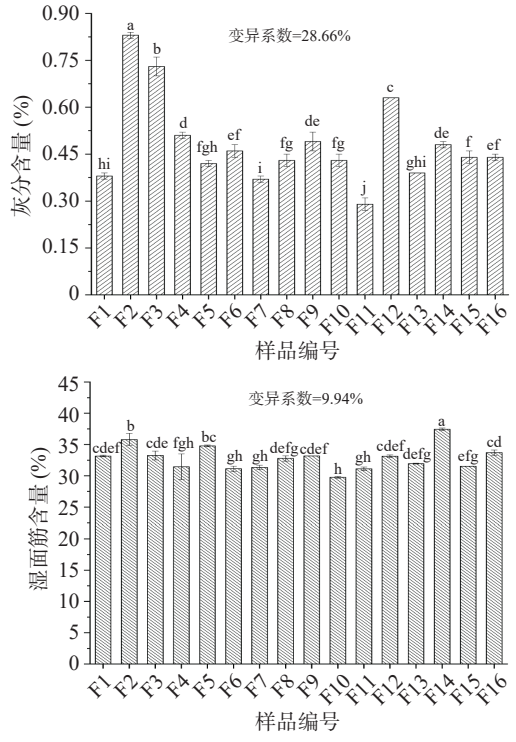


图 1 16 种挂面小麦粉灰分和湿面筋含量

Fig.1 Ash content and wet gluten content of 16 types of wheat flours for dried noodles

注: 图中不同小写字母表示差异显著(P<0.05); 图 2 同。

表 3　16 种挂面小麦粉粗细度

Table 3　Fineness degree of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	粗细度分布(%)							
	-/9xx	9xx/10xx	10xx/11xx	11xx/12xx	12xx/13xx	13xx/14xx	14xx/15xx	15xx/-
F1	0.22±1.35^{o}	2.52±1.22^{n}	2.36±1.53^{n}	3.94±1.11^{p}	19.38±1.39^{h}	51.58±1.20^{a}	11.58±0.96^{f}	0.11±1.03^{l}
F2	1.77±1.45^{e}	9.30±1.40^{c}	4.74±2.00^{j}	10.23±1.40^{l}	6.88±1.13^{n}	7.94±1.07^{m}	7.79±0.20^{h}	48.52±2.00^{b}
F3	2.91±2.31^{b}	6.83±1.00^{e}	9.48±1.53^{f}	6.67±0.96^{n}	7.28±1.04^{m}	27.45±0.83^{g}	3.09±2.02^{l}	32.95±1.14^{c}
F4	2.95±1.30^{a}	5.84±1.25^{g}	3.40±1.00^{l}	10.93±0.95^{k}	14.50±0.61^{k}	29.07±1.34^{e}	17.71±1.33^{b}	8.90±1.80^{d}
F5	1.23±1.51^{k}	5.63±1.08^{i}	10.36±2.31^{e}	15.08±1.32^{g}	45.61±2.55^{a}	13.17±2.88^{k}	1.65±3.26^{m}	0.41±2.31^{j}
F6	2.89±1.40^{b}	8.62±1.40^{d}	3.55±2.00^{k}	15.02±1.30^{h}	12.11±1.64^{l}	27.52±1.49^{f}	17.51±0.16^{c}	8.66±1.66^{e}
F7	0.99±2.50^{l}	6.52±2.30^{f}	3.42±2.00^{l}	19.32±1.70^{c}	15.77±1.47^{j}	34.27±1.98^{c}	12.73±0.90^{d}	1.63±1.73^{i}
F8	2.27±0.40^{d}	15.93±1.75^{a}	14.13±2.52^{d}	15.85±1.55^{f}	38.71±1.03^{b}	9.40±2.20^{l}	0.01±0.45^{n}	0.01±0.58^{m}
F9	0.96±1.45^{m}	11.18±1.56^{b}	15.16±2.00^{c}	17.09±1.40^{e}	26.88±1.82^{e}	16.56±0.73^{j}	6.07±0.45^{j}	2.40±0.94^{g}
F10	1.35±0.79^{j}	4.09±3.03^{l}	6.06±8.74^{h}	11.89±3.80^{j}	26.79±0.65^{f}	34.23±1.63^{d}	8.12±0.60^{g}	3.55±1.74^{f}
F11	1.68±0.25^{g}	3.84±1.27^{m}	30.58±1.00^{a}	18.46±0.95^{d}	31.25±1.53^{c}	9.42±0.84^{l}	0.01±0.29^{n}	0.01±0.11^{m}
F12	2.33±0.55^{c}	5.29±2.15^{i}	3.36±2.52^{m}	4.52±1.76^{o}	3.08±2.19^{o}	5.08±1.28^{n}	11.75±0.79^{e}	63.26±1.52^{a}
F13	1.74±1.40^{f}	5.16±1.91^{j}	5.91±2.08^{i}	25.32±1.54^{b}	28.11±0.89^{d}	23.88±1.79^{h}	5.94±0.11^{k}	1.69±2.08^{h}
F14	1.48±1.55^{h}	5.13±1.60^{k}	26.20±2.08^{b}	32.94±1.56^{a}	26.30±0.74^{g}	4.31±1.25^{o}	0.01±0.35^{n}	0.01±0.07^{m}
F15	1.38±0.50^{i}	5.73±1.60^{h}	1.82±2.08^{o}	7.65±1.40^{m}	19.16±2.28^{i}	22.11±2.43^{i}	35.52±0.43^{a}	2.41±2.08^{g}
F16	0.88±1.65^{n}	2.40±2.41^{o}	9.42±2.52^{g}	13.61±1.90^{i}	15.76±1.24^{j}	43.84±0.48^{b}	7.03±0.04^{i}	0.34±1.52^{k}
变异系数(%)	47.30	54.78	90.62	53.09	55.57	62.71	99.12	178.64

注：axx/bxx指通过axx筛网孔径而没有通过bxx筛网孔径小麦粉质量占比(%)，如：‘-/9xx’指未通过9xx筛网孔径的小麦粉质量占比；‘9xx/10xx’指通过9xx筛网孔径而没有通过10xx 筛网孔径小麦粉质量占比，表8同。

指标[16]。如表 4 所示，16 种挂面小麦粉流变学特性中，除粉质吸水率外，其余指标变异系数均大于 50%，表明不同挂面小麦粉样品的粉质特性存在一定差异，数据跨度较大。其中粉质吸水率、形成时间和稳定时间分别在 60.70%~66.20%、1.40~15.00 min 和 3.37~21.07 min 之间，弱化度范围为 15.00~142.00 FU，粉质指数范围为 41.00~289.00 mm。淀粉糊化时黏度急剧上升，形成糊状，如表 5 所示，16 种小麦粉 RVA 糊化特性中，峰值黏度、低谷黏度和最终黏度范围分别为 1456.00~3422.50 cP、634.50~2091.00 cP 和 1472.50~3432.50 cP，三者变异系数均大于 20%。崩解值、回生值和峰值时间范围分别为 600.00~1398.00 cP、838.00~1582.50 cP 和 5.57~6.53 min，其中峰值时间的变异系数最小，为 4.31%。DSC 可以从热学角度表征淀粉的糊化性质，如表 6 所示，16 种挂面小麦粉糊化初始温度、糊化峰值温度、糊化最终温度和糊化焓值的范围分别为 51.47~58.64 ℃、61.73~64.20 ℃、67.53~70.18 ℃ 和 0.89~4.12 J/g。糊化焓值的变异系数显著相比其他三个指标大，为 83.04%。

表 4　16 种挂面小麦粉粉质特性

Table 4　Farinograph properties of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	吸水率（%）	形成时间（min）	稳定时间（min）	弱化度（FU）	粉质指数（mm）
F1	61.00±0.14^{ij}	1.50±0.04^{hi}	12.73±0.24^{e}	27.00±2.83^{h}	142.00±2.83^{d}
F2	65.40±0.28^{b}	3.83±0.10^{f}	5.07±0.42^{i}	97.00±4.24^{c}	74.00±1.41^{g}
F3	62.80±0.00^{e}	4.87±0.11^{d}	12.88±0.35^{e}	28.00±1.41^{h}	141.00±2.83^{d}
F4	61.70±0.14^{g}	1.80±0.17^{ghi}	6.47±0.82^{hi}	94.00±5.66^{c}	74.00±5.66^{g}
F5	66.20±0.14^{a}	15.00±0.21^{a}	17.42±0.40^{b}	22.00±7.07^{hi}	289.00±7.07^{a}
F6	62.90±0.28^{e}	1.72±0.20^{ghi}	8.10±0.31^{g}	52.00±4.24^{f}	87.00±1.41^{f}
F7	60.70±0.14^{j}	1.93±0.07^{g}	6.63±0.44^{hi}	68.00±2.83^{e}	79.00±7.07^{fg}
F8	66.10±0.00^{a}	14.75±0.06^{a}	13.75±0.37^{d}	41.00±5.66^{g}	237.00±5.66^{b}
F9	61.60±0.14^{gh}	4.20±0.24^{e}	6.22±0.30^{hi}	108.00±1.41^{b}	74.00±7.07^{g}
F10	64.80±0.00^{c}	4.73±0.06^{d}	5.88±0.04^{i}	92.00±2.83^{c}	72.00±2.83^{g}
F11	64.20±0.00^{d}	1.40±0.16^{i}	3.37±0.00^{j}	142.00±1.41^{a}	41.00±1.41^{i}
F12	65.40±0.14^{b}	2.08±0.21^{g}	6.92±0.08^{h}	77.00±5.66^{d}	55.00±0.00^{h}
F13	61.30±0.14^{hi}	1.77±0.35^{ghi}	6.25±0.17^{hi}	88.00±4.24^{c}	71.00±4.24^{g}
F14	62.40±0.00^{f}	8.58±0.06^{b}	15.33±0.13^{c}	44.00±2.83^{fg}	168.00±0.00^{c}
F15	65.20±0.14^{b}	1.77±0.06^{ghi}	21.07±0.17^{a}	15.00±4.24^{i}	44.00±5.66^{i}
F16	64.70±0.28^{c}	6.47±0.25^{c}	9.65±0.07^{f}	66.00±1.41^{e}	121.00±2.83^{e}
变异系数(%)	3.03	98.17	50.65	54.20	63.58

2.1.3　小麦粉食用品质指标描述性分析　挂面烹调过程中由于各种物理、化学和酶的修饰作用，会影响淀粉的消化率及其营养价值[17]。由表 7 可得，16 种挂面最佳烹调时间范围为 4.75~7.50 min，变异系数为 11.59%。烹调损失率范围为 4.24%~7.40%，除 F3、F4 和 F16 样品外，其余挂面熟断条率均为 0，16 种挂面的烹调损失率和熟断条率均符合标准 GB/T 40636-2021 挂面，其中所规定范围为：烹调损失率≤10.0%，熟断条率≤5.0%。挂面烹调损失率和熟断条率的变异系数分别为 12.57% 和 224.58%，三项指标变异系数均大于 10%，不同挂面食用品质指标存在差异。综合上述三个维度品质指标，从变异系数来看 16 个挂面小麦粉的品质受样品影响较大，所选 16 种供试样品具有代表性。

2.1.4　挂面淀粉水解率描述性分析　由图 2 得，16 种挂面样品在 120 min 时淀粉水解率 H_{120} 范围为 19.46%~29.12%，变异系数为 17.86%；随着消化时间的延长，在 240 min 消化终点时淀粉水解率 H_{240} 范围为 30.64%~47.08%，变异系数为 17.08%，此消化趋势与黄艳梅[14] 的研究结果类似，从变异系数看 16

表 5 16 种挂面小麦粉糊化特性

Table 5 Pasting properties of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	峰值黏度(cP)	低谷黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	峰值时间(min)
F1	2718.00±45.25^{c}	1747.50±27.58^{cd}	970.50±17.68^{c}	3075.00±36.77^{e}	1327.50±9.19^{ef}	6.20±0.00^{d}
F2	2136.00±73.54^{fg}	1275.00±57.98^{f}	861.00±15.56^{ef}	2679.50±82.73^{g}	1404.50±24.75^{c}	6.30±0.04^{c}
F3	2696.50±55.86^{cd}	1734.00±11.31^{cd}	962.50±44.55^{c}	3316.50±60.10^{bc}	1582.50±48.79^{a}	6.30±0.04^{c}
F4	2185.50±9.19^{f}	1266.50±3.54^{f}	919.00±12.73^{d}	2568.50±4.95^{h}	1302.00±8.49^{efg}	6.20±0.00^{d}
F5	2619.00±23.33^{cd}	1878.50±64.35^{b}	740.50±0.71^{h}	3153.00±86.27^{de}	1274.50±21.92^{g}	6.50±0.04^{a}
F6	2716.50±99.70^{c}	1685.00±69.30^{d}	1031.50±30.41^{b}	2870.50±82.73^{f}	1185.50±13.44^{h}	6.37±0.05^{bc}
F7	2080.50±43.13^{gh}	1174.00±35.36^{g}	906.50±7.78^{d}	2261.00±35.36^{j}	1087.00±0.00^{i}	6.04±0.05^{e}
F8	2511.00±11.31^{e}	1595.00±29.70^{e}	916.00±18.38^{d}	2654.00±4.24^{gh}	1059.00±25.46^{i}	6.37±0.05^{bc}
F9	2668.50±16.26^{cd}	1780.50±4.95^{c}	888.00±21.21^{de}	3243.00±5.66^{cd}	1462.50±10.61^{b}	6.40±0.00^{b}
F10	2629.00±35.36^{cd}	2029.00±33.94^{a}	600.00±1.41^{i}	3413.00±67.88^{ab}	1384.00±33.94^{cd}	6.53±0.00^{a}
F11	1456.00±15.66^{i}	634.50±7.78^{i}	821.50±2.12^{fg}	1472.50±2.12^{l}	838.00±5.66^{k}	5.57±0.05^{g}
F12	2033.50±17.68^{h}	1139.50±3.54^{g}	894.00±14.14^{de}	2426.00±9.90^{i}	1286.50±6.36^{fg}	6.17±0.05^{d}
F13	3422.50±63.64^{a}	2024.50±20.51^{a}	1398.00±2.83^{a}	3363.00±35.36^{ab}	1338.50±14.85^{de}	6.13±0.00^{d}
F14	2602.00±42.43^{de}	1884.50±19.09^{b}	717.50±23.33^{h}	3184.00±39.60^{d}	1299.50±20.51^{efg}	6.40±0.00^{b}
F15	2884.00±24.04^{b}	2091.00±42.43^{a}	793.00±18.38^{g}	3432.50±16.26^{a}	1341.50±26.16^{de}	6.50±0.04^{a}
F16	1492.00±11.41^{i}	708.00±1.41^{h}	784.00±0.00^{g}	1623.50±0.71^{k}	915.50±0.71^{j}	5.73±0.00^{f}
变异系数(%)	20.86	29.63	19.60	21.80	15.60	4.31

表 6 16 种挂面小麦粉热特性

Table 6 Thermodynamic properties of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	糊化初始温度(℃)	糊化峰值温度(℃)	糊化最终温度(℃)	糊化焓值(J/g)
F1	57.06±0.11^{g}	63.09±0.11^{fgh}	69.51±0.06^{de}	0.89±0.01^{h}
F2	57.68±0.07^{ef}	63.63±0.13^{cd}	69.84±0.08^{bc}	1.07±0.01^{g}
F3	58.64±0.21^{a}	64.08±0.17^{ab}	69.34±0.24^{ef}	1.65±0.00^{b}
F4	58.40±0.08^{ab}	63.41±0.03^{de}	69.69±0.03^{cd}	1.11±0.01^{g}
F5	58.18±0.04^{bc}	64.20±0.00^{a}	70.18±0.06^{a}	1.43±0.00^{c}
F6	55.73±0.10^{i}	62.81±0.31^{hi}	68.30±0.10^{i}	1.15±0.00^{f}
F7	57.66±0.01^{ef}	63.29±0.16^{ef}	69.00±0.06^{gh}	0.92±0.00^{h}
F8	58.11±0.13^{bcd}	63.20±0.23^{efg}	69.51±0.03^{de}	1.77±0.00^{b}
F9	58.04±0.00^{cd}	63.04±0.07^{fgh}	67.53±0.10^{k}	2.85±0.02^{b}
F10	57.64±0.20^{ef}	62.94±0.10^{gh}	68.89±0.24^{h}	1.38±0.01^{c}
F11	51.47±0.13^{j}	61.73±0.10^{j}	67.80±0.03^{j}	4.12±0.03^{a}
F12	58.17±0.24^{bcd}	63.80±0.07^{bc}	70.07±0.00^{ab}	1.29±0.05^{e}
F13	56.47±0.08^{h}	62.51±0.01^{i}	69.20±0.06^{fg}	1.30±0.01^{de}
F14	57.48±0.27^{f}	63.15±0.10^{efg}	69.35±0.04^{ef}	1.34±0.00^{d}
F15	55.82±0.16^{i}	62.58±0.16^{i}	70.04±0.11^{ab}	1.29±0.02^{e}
F16	57.85±0.06^{de}	63.46±0.04^{de}	69.68±0.01^{cd}	1.43±0.00^{c}
变异系数(%)	3.84	1.96	1.13	83.04

表 7 16 种挂面小麦粉食用品质

Table 7 Edible quality of 16 types of wheat flours for dried noodles

样品编号	烹调损失率(%)	熟断条率(%)	烹调时间(min)
F1	6.25±0.09^{e}	0.00±0.00^{b}	6.25±0.35^{bc}
F2	6.55±0.14^{cd}	0.00±0.00^{b}	6.25±0.35^{bc}
F3	4.24±0.08^{k}	3.75±1.77^{ab}	7.50±0.71^{a}
F4	5.82±0.10^{g}	5.00±0.00^{a}	6.50±0.00^{b}
F5	5.31±0.07^{j}	0.00±0.00^{b}	6.50±0.00^{b}
F6	5.64±0.02^{gh}	0.00±0.00^{b}	5.50±0.00^{cdef}
F7	5.56±0.05^{hi}	0.00±0.00^{b}	5.00±0.00^{ef}
F8	6.16±0.13^{ef}	0.00±0.00^{b}	5.50±0.71^{cdef}
F9	6.04±0.06^{fg}	0.00±0.00^{b}	5.50±0.00^{cdef}
F10	6.50±0.09^{d}	0.00±0.00^{b}	6.00±0.00^{bcd}
F11	6.64±0.01^{bcd}	0.00±0.00^{b}	5.25±0.35^{def}
F12	6.77±0.10^{b}	0.00±0.00^{b}	5.50±0.00^{cdef}
F13	5.54±0.03^{hi}	0.00±0.00^{b}	5.75±0.35^{bcde}
F14	6.74±0.07^{bc}	0.00±0.00^{b}	5.50±0.00^{cdef}
F15	7.40±0.16^{a}	0.00±0.00^{b}	5.75±0.35^{bcde}
F16	5.40±0.12^{ij}	2.50±1.77^{b}	4.75±0.35^{f}
变异系数(%)	12.57	224.58	11.59

种样品在淀粉耐消化特性上存在一定差异。动态模拟消化模型挂面的终点淀粉水解率与以往有关其静态消化的研究数据相比而言偏低，原因可能是两者消化液酶的添加量和类型有所差异[18]；另外 Bornhorst 等[19] 指出，食物在仿生胃模型内较长的停留时间很大程度上会抑制淀粉的水解率，这可能也是造成动态和静态两种消化模型淀粉水解率差异的原因。

2.2 16 种挂面专用小麦粉品质指标与淀粉水解率相关性分析

对小麦粉营养、加工、食用品质三个维度指标与挂面淀粉水解率进行 Pearson 相关性分析如表 8 所示。结果显示，H_{120} 与 B 淀粉、峰值黏度、挂面烹调

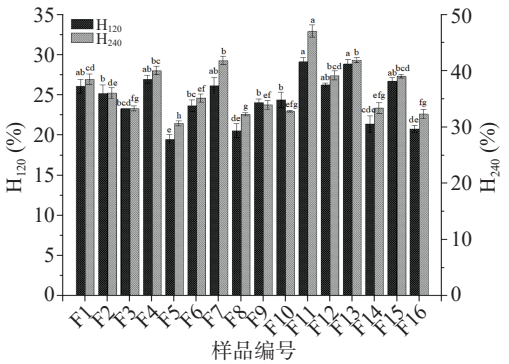


图 2 16 种挂面消化 120 min 和 240 min 时的淀粉水解率

Fig.2 Starch hydrolysis rate of 16 types of dried noodles at 120 min and 240 min digestion time

表 8　小麦粉品质指标与淀粉水解率的相关系数

Table 8　Correlation coefficient between quality index of wheat flour and starch hydrolysis rate

品质指标	H_{120}	H_{240}	品质指标	H_{120}	H_{240}	品质指标	H_{120}	H_{240}
总淀粉	0.309	0.166	-/9xx	0.115	−0.087	峰值黏度	0.503*	0.512*
直链淀粉	−0.415	−0.587*	9xx/10xx	−0.293	−0.121	低谷黏度	−0.440	−0.226
损伤淀粉	0.079	0.145	10xx/11xx	−0.532*	−0.484	崩解值	0.701**	0.536*
B淀粉	0.535*	0.662**	11xx/12xx	−0.018	0.032	最终黏度	0.120	−0.030
蛋白质	0.355	−0.063	12xx/13xx	0.295	−0.203	回生值	−0.279	−0.031
脂肪	0.170	−0.120	13xx/14xx	0.249	0.134	峰值时间	−0.286	−0.498*
氨基酸总量	−0.524*	0.391	14xx/15xx	0.184	−0.250	糊化初温	−0.256	−0.074
硫胺素	−0.342	0.002	15xx/-	0.327	0.017	糊化峰温	−0.191	−0.131
烟酸	0.178	−0.086	吸水率	0.348	0.464	糊化终温	0.167	0.034
泛酸	−0.169	−0.140	形成时间	−0.538*	−0.403	糊化焓值	−0.659**	−0.402
膳食纤维	−0.354	−0.058	稳定时间	−0.020	0.188	烹调损失率	0.232	0.194
灰分	−0.553*	−0.307	弱化度	−0.362	0.293	熟断条率	0.054	0.005
湿面筋	−0.415	0.090	粉质指数	−0.277	−0.334	烹调时间	0.528*	0.214

注：*表示在0.05水平上相关性显著，**表示在0.01水平上相关性极显著。

时间呈显著正相关（$P<0.05$），与崩解值呈极显著正相关（$P<0.01$）；H_{240} 与峰值黏度、崩解值呈显著正相关（$P<0.05$），与 B 淀粉呈极显著正相关（$P<0.01$）。H_{120} 与氨基酸总量、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间呈显著负相关（$P<0.05$），与糊化焓值呈极显著负相关（$P<0.01$）；H_{240} 与直链淀粉、峰值时间呈显著负相关（$P<0.05$）。相关性分析表明各项指标之间相关性复杂且存在信息重叠，综上所述，从小麦粉 40 个品质指标中选择相关性高的直链淀粉、B 淀粉、氨基酸总量、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间、峰值黏度、崩解值、峰值时间、糊化焓值、挂面烹调时间 11 个指标进行主成分降维分析，以进一步精简筛选品质指标。

2.3　不同挂面专用小麦粉品质指标主成分分析

2.3.1　主成分选择　主成分分析法（principal components analysis, PCA）是一种基础的多变量统计分析方法，通过降维减少变量个数，实现信息浓缩[20]，适用于指标之间存在一定相关和信息重叠的情况。以特征值>1 的方差贡献率确定最优主成分数，由表 9 和图 3 可得，第 1 主成分的特征值为 3.224，方差贡献率为 29.307%，为最重要的主成分；后两个主成分的重要性依次降低，前 3 个主成分对应的累计方差贡献率达到 71.460%，表明 3 个主成分已经包含了绝大部分信息，因此可以用缩减得到的 3 个主成分代替进一步筛选适宜进行评价的指标。

由主成分因子载荷矩阵表可知，其绝对值越大，对该主成分影响越主要（表 10）；因此，主成分 1 以 B 淀粉（CV=16.61%）的影响为主，峰值时间（CV=4.31%）、粗细度 10xx/11xx（CV=90.62%）的影响为辅；主成分 2 以灰分（CV=28.66%）的影响为主，氨基酸总量（CV=8.81%）和糊化焓值（CV=83.04%）的影响为辅；主成分 3 以峰值黏度（CV=20.86%）为主，以面团形成时间（CV=98.17%）和崩解值（CV=9.60%）的影响为辅。结合变异系数和相关性分析结果，最终得到 6 种挂面专用小麦粉关键性指标分别为 B 淀粉、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间、峰值黏度、糊化焓值。

表 9　主成分特征值及贡献率

Table 9　Principal component eigenvalue and contribution rate

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	3.224	29.307	29.307	3.224	29.307	29.307
2	2.806	28.147	57.454	2.806	28.147	57.454
3	1.341	14.006	71.460	1.341	14.006	71.460
4	0.916	8.323	79.783			
5	0.806	7.329	87.112			
6	0.553	5.027	92.139			
7	0.384	3.490	95.629			
8	0.231	3.008	98.637			
9	0.102	0.928	99.565			
10	0.038	0.344	99.909			
11	0.010	0.091	100.000			

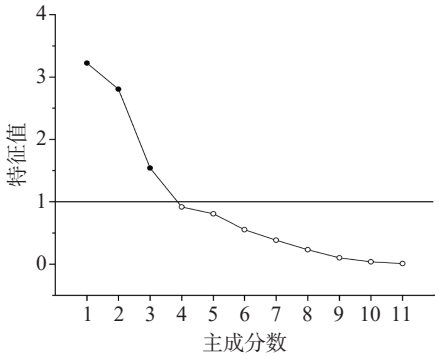


图 3　主成分分析碎石图

Fig.3　Principal component analysis lithotripsy

2.3.2　主成分线性关系和综合得分 F 的计算　依据成分矩阵计算特征向量矩阵，另外将参与分析的原始变量进行数据标准化转变为无量纲值，对应记为 $X_{i(i=1\sim11)}$，变量标准化值结合特征向量矩阵构建 3 个

表 10 主成分因子载荷矩阵

Table 10 Principal component factor load matrix

指标	旋转后的成分矩阵		
	PC1	PC2	PC3
直链淀粉(X_1)	0.672	−0.035	−0.082
B淀粉(X_2)	**−0.831**	0.063	−0.260
氨基酸总量(X_3)	−0.290	**0.803**	0.236
灰分(X_4)	−0.010	**0.860**	−0.144
粗细度10xx/11xx(X_5)	**0.700**	−0.246	0.127
面团形成时间(X_6)	0.168	−0.056	**0.823**
峰值黏度(X_7)	0.323	0.300	**0.855**
崩解值(X_8)	−0.542	0.131	**0.652**
峰值时间(X_9)	**0.746**	0.476	0.329
糊化焓值(X_{10})	−0.184	**−0.732**	−0.098
挂面烹调时间(X_{11})	−0.415	0.694	0.183

注: 加粗的数据为同一主成分中贡献率较大的品质指标。

主成分的函数表达式 $Z_{i(i=1\sim3)}$如下所示:

$$Z_1=0.374X_1-0.463X_2-0.162X_3-0.006X_4+0.390X_5+0.094X_6+0.180X_7-0.302X_8+0.415X_9-0.102X_{10}-0.231X_{11}$$

$$Z_2=-0.021X_1+0.038X_2+0.479X_3+0.513X_4-0.417X_5-0.033X_6+0.179X_7+0.078X_8+0.284X_9-0.437X_{10}+0.414X_{11}$$

$$Z_3=-0.071X_1-0.225X_2+0.204X_3-0.124X_4+0.110X_5+0.711X_6+0.738X_7+0.563X_8+0.284X_9-0.085X_{10}+0.158X_{11}$$

3 个表达式中, X_1~X_{11} 分别为直链淀粉、B 淀粉、氨基酸总量、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间、峰值黏度、崩解值、峰值时间、糊化焓值、挂面烹调时间。

以每个主成分对应的方差贡献率占比计算其权重系数, 结合上述函数表达式可得综合得分公式 F:

$$F=\frac{29.307Z_1+28.147Z_2+14.006Z_3}{71.460}$$

结合上述所有主成分的函数表达式计算综合得分 F 如表 11 所示。其值越大, 表示挂面具有越缓慢的淀粉消化特性, 越耐消化。由综合得分情况表可知, 16 份挂面中, F5 样品得分最高, 达到了 1.94 分, 其次是 F8 和 F16 样品, 分别为 0.98 和 0.79 分; F7、F13、F11 样品综合得分最低, 为−0.89、−1.53 和−2.21 分。

2.4 不同挂面专用小麦粉聚类分析

聚类分析(cluster analysis, CA)是对未知变量相似程度进行定量分组的一种数学分类方法[21]。以主成分得到的综合得分作为变量, 采用组间联接(平方欧氏距离)法对供试的 16 个小麦粉样品进行系统聚类分析, 结果如图 4 所示, 当欧氏距离为 7 时, 不同样品聚为 3 类。第一类为 F3、F5、F8、F9、F10、F14、F16 号样品; 第二类为 F1、F2、F4、F6、F12 号样品; 第三类为 F7、F11、F13、F15 号样品。为了选取耐消化挂面的小麦粉, 要求淀粉消化速度缓慢, 有助于维持血糖稳定, 因此第一类挂面专用粉作为优质原料较为适合, 可用作耐消化挂面专用小麦粉原料选择的依据。结合聚类结果得到关键指标推荐取值范围(表 12): B 淀粉含量 10.15%~16.91%、灰分含量 0.42%~0.73%、粗细度 10xx/11xx 质量占比 6.06%~26.20%、面团形成时间 4.20~15.00 min、峰值黏度 1492.00~2697.00 cP、糊化焓值 1.34~2.85 J/g。

表 11 16 种挂面主成分综合得分

Table 11 Composite score of principal components for 16 types of dried noodles

样品编号	Z_1	Z_2	Z_3	F	排序
F1	0.78	−0.89	0.12	−0.01	10
F2	2.18	−1.19	−1.68	0.10	9
F3	2.81	−1.26	−1.06	0.45	5
F4	0.51	−0.89	−0.46	−0.23	11
F5	2.55	0.42	3.70	1.94	1
F6	0.03	0.38	0.36	0.23	8
F7	−1.24	−0.93	−0.04	−0.89	14
F8	1.05	0.88	1.02	0.98	2
F9	−0.46	1.30	0.50	0.42	7
F10	−0.32	1.80	−0.75	0.43	6
F11	−4.48	−1.52	1.17	−2.21	16
F12	0.09	−0.72	−0.91	−0.42	12
F13	−2.07	−1.54	−0.36	−1.53	15
F14	−0.08	1.85	−0.39	0.62	4
F15	−0.35	−0.90	−0.81	−0.66	13
F16	−0.99	3.23	−0.41	0.79	3

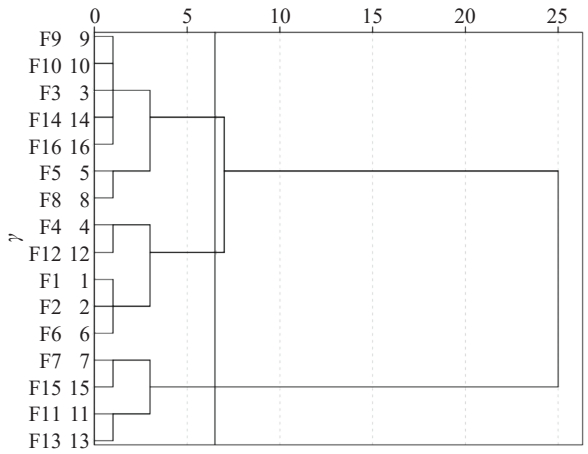


图 4 16 种挂面专用小麦粉聚类分析树状图

Fig.4 Dendrogram of cluster analysis for 16 types of wheat flours for dried noodles

表 12 耐消化挂面专用小麦粉原料主要品质指标范围

Table 12 Main quality index range of wheat flour for dried noodles raw materials for low starch digestion

小麦粉品质指标	最小值	最大值	平均值	标准差	取值范围
B淀粉(%)	10.15	16.91	13.84	2.52	10.15~16.91
灰分(%)	0.42	0.73	0.53	0.11	0.42~0.73
粗细度10xx/11xx(%)	6.06	26.20	14.23	7.83	6.06~26.20
面团形成时间(min)	4.20	15.00	7.94	4.84	4.20~15.00
峰值黏度(cP)	1492.00	2697.00	2088.00	94.27	1492.00~2697.00
糊化焓值(J/g)	1.34	2.85	1.64	0.65	1.34~2.85

3　讨论

目前挂面专用小麦粉的生产和品质把控多是以挂面感官、食用等品质为导向，缺乏有针对性的即适合高血糖和肥胖人群的耐消化挂面专用小麦粉挑选依据。体外动态模拟消化系统可以很好模拟胃肠道的蠕动、消化液的持续分泌和食物连续消化等动态过程，相比静态更接近于真实的体内消化情况，近些年有着越来越多的应用[22−24]。食物在体内的消化吸收的程度和速率是影响食物 GI 最主要的因素，缓慢耐消化或者不消化吸收的碳水化合物都将降低食物的 GI，从而有利于血糖的稳定[25]。

许多研究表明[17,26]，无论植物来源如何，淀粉颗粒尺寸越小，比表面积越大，对酶的敏感性越高，与淀粉酶结合程度就越高，从而会使淀粉消化程度增加。小麦淀粉根据颗粒尺寸来分类可分为 A 型和 B 型[11]，B 淀粉颗粒较小（<10 μm），呈球形或不规则的多面体，具有较大的比表面积，这就使其比大的淀粉颗粒具备更多酶作用位点，更易与酶接触，水解速度快，相比 A 淀粉（≥10 μm）而言容易被消化[27]。本研究得出高 B 淀粉含量的挂面专用粉一定程度上更不耐消化，符合前人的研究结果。灰分是表征小麦粉加工精度的重要指标，高加工精度通常伴随着淀粉颗粒结构的破坏和损伤淀粉的增加，提高了小麦粉吸水率和酶敏感性，从而加速淀粉的消化[28]。由此推测低灰分含量小麦粉的淀粉在某种程度上更耐消化，与本研究相关性分析得出的结果相符，在生产耐消化挂面专用小麦粉时建议遵循适度加工的原则。小麦粉的粗细度也会影响面条的淀粉消化，进而影响 GI。Zhou 等[29]表明谷物或豆类粗颗粒粉的消化速度比细颗粒粉慢，其较完整的胚乳细胞壁结构是淀粉水解酶生物可及性的重要物理屏障。未穿过 10xx 筛网孔径的粉属于较粗颗粒粉，其质量占比越大的小麦粉的淀粉一定程度上更耐消化。粉质形成时间主要反映了面团形成过程中面筋网络的强度与延展性，本研究得出其对淀粉水解率有负向影响，可能是由于较长的形成时间通常意味着强韧的面筋网络，被包裹在内的淀粉颗粒难与酶接触从而阻碍淀粉的消化[30]。挂面在高温烹调过程中会经历淀粉糊化，淀粉糊化程度是决定淀粉类食物消化率和营养特性的关键因素[31]。Balet 等[32] 指出较高的峰值黏度表明糊化过程淀粉颗粒溶胀程度高，面粉更容易发生淀粉水解；Guo 等[33] 指出糊化焓值反映了小麦粉加热过程中的能量变化，值越高表明糊化水平越低。由此推测，低峰值黏度和高糊化焓值的挂面专用粉一定程度上更耐消化，符合本研究得出的结果，今后在挑选耐消化挂面专用粉时可重点考虑这些指标。

运用相关性分析、主成分分析、聚类分析等多元统计分析方法进行耐消化挂面专用小麦粉原料选择研究，可以规避主观因素的影响，使原料品质与成品品质之间的关联关系得以很好反映，便于综合评价多项指标，使评价结果更为科学、精准。后续研究还可继续完善，如扩大小麦粉样本容量和取样范围、采集食物体内消化数据来丰富数据库，同时继续基于多种多元统计分析方法相结合的方式进行分析，从而进一步为低消化性挂面专用小麦粉开发和品质预测提供便捷，满足专用粉行业的多样化需求。

4　结论

本研究从原料品质端角度切入来筛选耐消化挂面专用小麦粉，以全国范围内征集的 16 种挂面专用小麦粉为实验材料，测定了 40 项品质指标，其变异系数范围为 1.13%~227.90%。将挂面专用小麦粉品质指标与挂面淀粉水解率进行相关性分析，结果表明各项指标之间相关性复杂且存在信息重叠，采用主成分分析对相关性高的 11 个指标进一步降维分析以筛选关键指标，并结合变异系数最终筛选出耐消化挂面专用小麦粉关键性指标为 B 淀粉、灰分、粗细度 10xx/11xx、面团形成时间、峰值黏度和糊化焓值；聚类分析法明确上述关键性指标推荐取值范围分别为 B 淀粉含量 10.15%~16.91%、灰分含量 0.42%~0.73%、粗细度 10xx/11xx 质量占比 6.06%~26.20%、面团形成时间 4.20~15.00 min、峰值黏度 1492.00~2697.00 cP、糊化焓值 1.34~2.85 J/g。研究结果可为挂面专用小麦粉的品质改良和产品预测提供参考，为后续低 GI 挂面的开发提供科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 王伟鹏，贾托雷. 关中手工挂面专用粉的开发[J]. 粮食加工，2024，49(4)：1−6. [WANG W P, JIA T L. Development of special flour for handmade hung dry noodle in Guanzhong[J]. Grain Processing, 2024, 49(4): 1−6.]

[2] 金铭. 小麦籽粒品质与面粉理化特性对挂面品质的影响[D]. 镇江：江苏大学，2022. [JIN M. Effects of grain quality and physicochemical properties of wheat flour on noodle qualities[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.]

[3] CHI C, LI X, HUANG S, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 154−168.

[4] 何瑞琪，徐晓飞. 一种低 GI 杂粮面条研制[J]. 农产品加工，2023(11)：1−4,8. [HE R Q, XU X F. Development of a low GI multigrain noodle[J]. Farm Products Processing, 2023(11): 1−4,8.]

[5] 王婷婷，蒙太和，张国治. 低升糖指数杂粮挂面研制[J]. 粮食加工，2023，48(5)：9−16. [WANG T T, MENG T H, ZHANG G Z. Development of multigrain noodles with low glycemic index[J]. Grain Processing, 2023, 48(5): 9−16.]

[6] 彭湃，王晓龙，马兰，等. 燕麦麸粉和苦荞皮粉的添加对小麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. 中国农业科学，2023，56(20)：4102−4114. [PENG P, WANG X L, MA L, et al. Effects of oat bran flour and tartary buckwheat bran flour on structure, cooking quality and digestive characteristics of wheat noodles[J]. Scien-

tia Agricultura Sinica, 2023, 56(20): 4102−4114.]
[7] LUO M, ZHANG H, WANG Z, et al. Effects of wheat bran flour, oat flour, and dictyophora indusiata powder on physical, chemical, sensorial, and *in vitro* digestibility of wheat noodles[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(12): 9615−9625.
[8] 李建华. 发酵包子对小麦粉品质要求的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022. [LI J H. Study on the quality requirements offermented Baozi for wheat flour[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.]
[9] 隋勇, 施建斌, 蔡沙, 等. 基于主成分与聚类分析的不同粉路小麦次粉品质综合评价[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 164−171, 244. [SUI Y, SHI J B, CAI S, et al. Comprehensive quality evaluation of different wheat middlings by principal component analysis and cluster analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 164−171,244.]
[10] GUO L, CHEN H, ZHANG Y Z, et al. Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemical properties and their effect on flour-based food systems[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2023, 21: 4172−4186.
[11] 尚保华, 孙睿, 姜文超, 等. 基于主成分分析的糯小麦品质评价和分类[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 322−329. [SHANG B H, SUN R, JIANG W C, et al. Quality evaluation and classification of waxy wheat varieties by principal component analysis[J]. Food Science, 2023, 44(22): 322−329.]
[12] 付兆燕, 刘佳雯, 齐沙沙, 等. 谷朊粉添加量对面粉糊化和馒头品质的影响[J]. 农产品加工, 2024(11): 7−9,18. [FU Z Y, LIU J W, QI S S, et al. Effect of wheat gluten addition on flour pasting and steamed bread characteristics[J]. Farm Products Processing, 2024(11): 7−9,18.]
[13] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardized static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus[J]. Food and Function, 2014, 5(6): 1113−1124.
[14] 黄艳梅. 蒲公英黄酮对马铃薯淀粉和面条体外消化特性的影响及其机制[D]. 苏州: 苏州大学, 2021. [HUANG Y M. Effects and mechanisms of dandelion flavonoids on *in vitro* digestive characteristics of potato starch and noodles[D]. Suzhou: Soochow University, 2021.]
[15] 张苹, 伍鹏, 段续, 等. 米饭冷藏时间对老年人胃排空和体外动态消化特性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(3): 94−101. [ZHANG P, WU P, DUAN X, et al. Effect of cold storage time on gastric emptying and *in vitro* dynamic digestion characteristics of cooked rice for the elderly[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(3): 94−101.]
[16] DIÓSI G, MŐRÉ M, SIPOS P. Role of the farinograph test in the wheat flour quality determination[J]. Acta Universitatis Sapientiae, Alimentaria, 2015, 8(1): 104−110.
[17] LAL M K, SINGH B, SHARMA S, et al. Glycemic index of starchy crops and factors affecting its digestibility: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 741−755.
[18] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: S33−50.
[19] BORNHORST G M, SINGH R P. Gastric digestion *in vivo* and *in vitro*: How the structural aspects of food influence the digestion process[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2014, 5(1): 11−32.
[20] MA X, WANG W, ZHENG C, et al. Quality evaluation of walnuts from different regions in China[J]. Foods, 2023, 12: 4123.
[21] 刘方, 翁庙成. 实验设计与数据处理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2021: 257. [LIU F, WENG M C. Experimental design and data processing[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2021: 257.]
[22] WANG J, WU P, WANG J, et al. *In vitro* gastric digestion and emptying of cooked white and brown rice using a dynamic human stomach system[J]. Food Structure, 2022, 31: 100245.
[23] 张光泉, 曾红亮. 基于动态体外人体胃肠系统的莲子回生淀粉结构变化及消化特性研究[C]//中国食品科学技术学会第二十一届年会论文摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2024: 2. [ZHANG G Q, ZENG H L. Structural changes and digestive properties of lotus seed retrogradation starch based on dynamic *in vitro* human gastrointestinal system[C]//Chinese Institute of Food Science and Technology 21st Annual Conference Abstracts Collection. Beijing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024: 2.]
[24] ZHANG H, DUAN S, YU Y, et al. Impact of casein-to-whey protein ratio on gastric emptying, proteolysis, and peptidome profile of fermented milk during *in vitro* dynamic gastrointestinal digestion in preschool children[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134840.
[25] 徐瑶, 刘晓凤, 杨月欣, 等. 碳水化合物质量指标以及血糖生成指数影响因素的进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 502−509. [XU Y, LIU X F, YANG Y X, et al. Progress in carbohydrate quality indicators and factors influencing glycemic index [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 502−509.]
[26] HONG J, AN D, ZENG X A, et al. Behaviors of large A-type and small B-type wheat starch granules esterified by conventional and pulsed electric fields assisted methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 516−523.
[27] 洪雁, 顾正彪. 淀粉性质与粉丝消化性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2007(8): 48−51. [HONG Y, GU Z B. The study of starch properties and the digestibility of starch-noodle[J]. Food and Fermentation Industries, 2007(8): 48−51.]
[28] 马思雨, 王晓曦, 田潇凌, 等. 制粉对小麦粉营养品质影响机理研究现状[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 187−194. [MA S Y, WANG X X, TIAN X L, et al. Research status of influence mechanism of milling on nutritional quality of wheat flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 187−194.]
[29] ZHOU H, LIU C, SHANG J, et al. Effect of adding wheat (*Triticum aestivum* L.) farina with varied integrity of endosperm cell wall on dough characteristics, dried noodles quality and starch digestibility[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 243: 125076.
[30] YAO M, LI M, DHITAL S, et al. Texture and digestion of noodles with varied gluten contents and cooking time: The view from protein matrix and inner structure[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126230.
[31] WANG S, COPELAND L. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: A review[J]. Food & Function, 2013, 4(11): 1564−1580.
[32] BALET S, GUELPA A, FOX G, et al. Rapid visco analyser (RVA) as a tool for measuring starch-related physiochemical properties in cereals: A review[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12: 2344−2360.
[33] GUO P, YU J, COPELAND L, et al. Mechanisms of starch gelatinization during heating of wheat flour and its effect on *in vitro* starch digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 370−378.